

# Měření izolačního odporu statorového vinutí generátoru v čase a aproximace různého počtu odečtených hodnot

Bohumil Paslavský  
Katedra elektroenergetiky a ekologie  
Fakulta elektrotechnická  
Západočeská univerzita v Plzni  
[paslaboh@kee.zcu.cz](mailto:paslaboh@kee.zcu.cz)

## Insulation Resistance Measurement of Stator Winding on Generator in Time and Approximation of Various Quantity Measured Values

**Abstract** – The measurement of insulation resistance is the basic diagnostic test, which is used for very long time. I look into possibilities approximation of measured values for graphical projections in dependence on number recorded values during measurement.

**Keywords** – Insulation Resistance; Stator Winding; Polarization Index; Insulation.

### I. ÚVOD

Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu jsou jedny ze základních a nejstarších diagnostických testů pro motory a generátory. Tato měření se provádí na samotný úvod diagnostiky daného stroje, přičemž jsou použitelná téměř pro všechna vinutí, jak statorová tak i rotorová. Měření izolačního odporu a následný výpočet polarizačního indexu nám o izolaci vinutí dává základní představu. Tato představa je globálního charakteru a není schopna zjistit elektricky slabá místa v izolačním systému. Velmi dobře dovede postihnout kontaminaci izolačního systému nečistotami či navlhnutí izolace.

### II. TEORIE A PRŮBĚH MĚŘENÍ

Izolační odpor vinutí elektrických strojů je popsán v mnoha standardech, přičemž základní myšlenka je prakticky bez jakékoliv odchylky. Celé měření izolačního odporu probíhá v závislosti na čase a pro standardní hodnocení jsou nejdůležitější odečty hodnot v časech 15; 60; a 600 sekund, přičemž počátkem časové osy je přiložení stejnosměrného zkušebního napětí na svorky zkoušeného objektu. Z těchto hodnot se počítají polarizační indexy, dle vzorců uvedených níže, a pro další zkoušení se hodnotí i izolační odpor izolace v čase 60s, který by měl být vyšší než minimální izolační odpor. Tabulka doporučených minimálních izolačních odporů, kterou ve své knize uvádí Greg C. Stone [1]. Tu přebírá autor ze standardu IEEE 43-2014.

$$PI = \frac{R_{IZ600}}{R_{IZ60}} \quad (1)$$

Greg C. Stone ve své knize operuje pouze s desetiminutovým polarizačním indexem (PI) počítaným dle rovnice (1), jako podíl izolačního odporu v desáté a první minutě.

Stejně k tomuto problému přistupuje i výrobce nejčastěji využívaných přístrojů firma MEGGER. Oproti tomu jiné zdroje např. pan V. Mentlík ve své knize Diagnostika elektrický zařízení [2] či různé podnikové předpisy výrobců či provozovatelů, operují i s minutovým polarizačním indexem, počítaným dle vztahu (2):

$$pi_{60} = \frac{R_{IZ60}}{R_{IZ15}} \quad (2)$$

Polarizační index první minuty je ve většině případů nižší než vypočtená hodnota pro minutu desátou, ale jeho význam v počátku měření je neocenitelný pro rychlý odhad stavu vinutí, které nemusí být přístupné pro vizuální kontrolu. Polarizační index pro nová vinutí se pohybuje výše než 4, pro provozovaná čistá vinutí bez kontaminace vlhkostí je vyšší než 2. Výsledný polarizační index 1 značí velmi vlhké nebo znečištěné vinutí.

Samotné měření tedy trvá po dobu deseti minut, avšak v čase 600s není měření ustáleno. To potvrzuje i výpočet časové konstanty (3) dle vzorce uvedeného v knize p. Mentlíka [2], která „maže“ rozdíly v geometrických a nominálních údajích stroje.

$$\tau_{600} = R_{IZ600} \cdot C_{0,2UfN} \quad (3)$$

Pro výpočet časové konstanty však na rozdíl od pana Mentlíka používám kapacitu změřenou při 0,2 násobku jmenovitého sdruženého napětí. To je běžně měřená hodnota, kterou získáváme při měření ztrátového činitele. Normy a standardy [3] pro toto měření předepisují pět napěťových kroků do 1,0  $U_N$ . Chyba při použití této hodnoty je zanedbatelná, protože k prudší změně kapacity dochází až při napěťových krocích od násobku 0,6, kdy dochází k většímu zapojování polovodiivých ochran na výstupu satorových tyčí / cívek z drážky.

### III. EXPERIMENT A MĚŘENÍ

Měření jsem provedl pro dva zkušební objekty. První měření bylo provedeno přístrojem Megger po dobu 30 minut a to bez připojené sítě – tj. napájení ze zabudované baterie v přístroji. První zkušební objekt byl nový generátor o kapacitě vinutí zhruba 0,6  $\mu F$  a jmenovitém napětí 19 kV. Druhé měření bylo provedeno stejným přístrojem v délce trvání 60 minut. Zkušební napětí bylo na svorky zkoušeného generátoru z přístroje, který byl připojen k síti. Druhý testovaný generátor byl již v dlouhodobém provozu a jeho parametry jsou: kapacita 0,18  $\mu F$  a jmenovité napětí 10,5 kV.

Odečty izolačního odporu byly prováděny každou minutu, přičemž byly doplněny o záznamy i v čase nejvýznamnějších změn tj. na začátku měření např. v časech 15, 30, 90 sekund. Měření bylo na obou satorových vinutích prováděno napětím 5kV, přičemž podle zvyklostí byla neměřená vinutí uzemněna a spojena s kostrou satoru. Zaznamenané hodnoty izolačního odporu jednotlivých fází na generátorech jsou uvedeny v tabulce 1.

Vzhledem k běžné praxi při měření jsem rozhodl porovnávat aproximace na základním intervalu 600s při různém počtu odečtených bodů, počínaje minimální množstvím tří měření (v časech 15, 60, 600 s), přes počet vhodný do logaritmických souřadnic (v časech 15, 60, 120, 240, 420, 600 s) po plný odečet 12 měření. Aproximace budou porovnány mezi sebou i s naměřenými hodnotami. Další oblast zájmu bude sledování funkcí na konci měřeného intervalu tj. v časech 30 či 60 minut a

jejich rozchod od skutečně naměřené hodnoty. Zajímavým bodem porovnání dosažených funkčních hodnot aproximačních funkcí bude pro časy, které můžeme považovat za ustálené. Tím jsou myšleny časy, které odpovídají trojnásobku časové konstanty pro daný stroj a měřenou fázi.

TABULKA I. NAMĚŘENÉ HODNOTY IZOLAČNÍHO ODPORU V ČASE

	Generátor 1 (nový, $U_N = 19 \text{ kV}$ )			Generátor 2 (v provozu, $U_N = 10,5 \text{ kV}$ )		
	U	V	W	U	V	W
t [s]	$R_{IZ} [\text{M}\Omega]$					
15	960	1012	1028	711	786	707
60	5020	5090	5000	1890	2010	1960
120	11310	11870	11430	2940	3130	3010
180	18910	19930	19180	3760	3980	3840
240	27600	28300	27700	4460	4650	4530
300	36000	36700	36200	5020	5300	5100
360	43800	45800	43600	5600	5880	5660
420	52100	55400	52300	6120	6450	6200
480	60200	59900	61500	6630	6970	6690
540	69400	71400	72800	7110	7450	7170
600	75100	78100	79300	7560	7930	7630
:	:	:	:			
1800	172100	167500	197000	14600	15100	14500
-	-	-	-	:	:	:
3600	N/A	N/A	N/A	22300	23000	21900

Na určené naměřené hodnoty jsem aplikoval tyto aproximace – lineární, logaritmickou, mocninou a polynomickou 2 řádu.

TABULKA II. VYPOČTENÉ ODPORY PRO TŘI HODNOTY NAMĚŘENÝCH ODPORŮ A POROVNÁNÍ S NAMĚŘENÝMI VÝSLEDKY V UVEDENÝCH ČASECH

Gen. 1	$R_{IZ} [\text{M}\Omega]$				
t [s]	naměřeno	lineární	mocninná	polynomická	logaritmická
15	960	144	966	958	-8745
60	5020	5904	4965	5018	20568
600	75100	75030	75338	75092	69256
1800	172100	228642	275766	371961	92486
138334	-	17706359	46525368	1305392524	184295
$R^2$	-	0,9996	1	1	0,8935

V tabulce 2 je názorně vidět, jak některé funkce mohou ubíhat od naměřených hodnot již na aproximovaném intervalu. Pro trojnásobek časové konstanty jsou patrné

velké rozdíly mezi jednotlivými aproximacemi. Logaritmická aproximace nedokáže navázat na měřené hodnoty a v tomto případě je nejnevhodnější z použitých.

TABULKA III. VYPOČTENÉ ODPORY PRO DVANÁCT HODNOT NAMĚŘENÝCH ODPORŮ A POROVNÁNÍ S NAMĚŘENÝMI VÝSLEDKY V UVEDENÝCH ČASECH

Gen. 2	$R_{IZ}$ [M $\Omega$ ]				
t [s]	naměřeno	lineární	mocninná	polynomická	logaritmická
15	711	1574	764	1061	-429
60	1890	2068	1827	1819	2249
600	7560	7992	7779	7399	6697
3000	22300	34323	21411	-46121	9806
4196	-	47444	26442	-120531	10454
$R^2$	-	0,9678	0,9977	0,9946	0,9215

Výsledky uvedené v tabulce jsou stabilnější – tj. jsou lépe „navázány“ na naměřené hodnoty, to je patrné i z koeficientu regrese, avšak mimo interval se v nesmyslných číslech ocitá polynomická aproximace druhého řádu. V měřeném intervalu má fyzikálně nemožný výsledek logaritmická funkce. Velmi dobře se opět chová funkce mocninná.

#### IV. ZÁVĚR

Mocninná aproximace se chová velice příznivě na uzavřeném intervalu naměřených hodnot, pro hodnoty vzdálené tomuto intervalu může vést k získání nereálných hodnot, to v případech, kdy exponent je větší než jedna. Nejslabší v rámci použití jsou aproximace lineární, logaritmická a polynomická, i přes to, že na první pohled se z koeficientu regrese může zdát, že o jejich vhodnosti by neměly být žádné pochyby. Obzvláště polynomické a logaritmické proložení mohou vést k nefyzikálním výsledkům jako je záporný izolační odpor, a to buď na začátku, nebo na konci aproximovaného intervalu.

#### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a společnosti BRUSH SEM spol. s r.o..

#### LITERATURA

- [1] Electrical Insulation for Rotating Machines – Design, Evaluation, Aging, testing, and Repair, G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, H. Dhirani, IEEE Press Wiley, 2014.
- [2] Diagnostika elektrických zařízení, V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prosr, P. Trnka, BEN, 2008.
- [3] ČSN EN 50209, Český normalizační institut, Praha (Česká Republika): Český normalizační institut, © 1999.
- [4] Diagnostika poruch izolací elektrických strojů, A. Barták, L. Mravinač, J. Neumann, J. Vařák, SNTL, 1984.
- [5] Dielektrické prvky a systémy, V. Mentlík, BEN, 2006.